

活動銀河からの水素分子輝線の起源をもとめて

毛利英明¹・川良公明²・西田 稔³・谷口 義明⁴

1 <気象研究所 〒305 つくば市長峰 1-1>

2 <ISO Science Operations Centre, Astrophysics Division of ESA, Villafranca 28080 Madrid, Spain>

3 <〒652 神戸市兵庫区会下山町 2 丁目 16-7>

4 <東北大学理学部天文学教室 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉>

赤外線天文学は 1980 年代中頃に本格的な分光観測の時代に突入した。最新鋭の機器が重点的に探查したのが活動銀河からの水素分子輝線だ。現在までの研究の歩みを紹介しよう。

水素分子の近赤外輝線はオリオンの星生成領域 (Orion-KL) で初めて観測された。1976 年のことである。系外天体では、セイファート銀河 NGC 1068 で 1978 年に最初の検出が報告されたが¹⁾、相互作用銀河 NGC 6240 と Arp 220 で 1984 年に見い出されて以降²⁾、水素分子輝線は脚光を浴びることとなる。これらが遠赤外域で非常に明るい特異天体で、その正体を巡っての論争が続いていたからだ。以来、活動銀河からの水素分子輝線の探究は赤外線天文学の重要な課題であった。

本稿ではセイファート (Seyfert) 銀河とスターバースト (starburst) 銀河を取り扱う。ともに中心部から膨大なエネルギーを放出している。セイファート銀河は代表的な活動的銀河中心核 (active galactic nucleus = AGN) で、大質量ブラックホールがガスを吸い込むことによりエネルギーを取り出している。スターバースト銀河のエネルギー源は短期間に大量に生まれた高温の OB 型星だ。また相互作用銀河 NGC 6240 については、特に注目すべき天体であるので、最後に議論することにする。

1. 水素分子とは？

水素分子のエネルギー準位は電子配置・振動・回転の 3 つのモードで決まる¹⁾。数多い赤外輝線は全て電子基底状態 $X^1\Sigma_g^+$ の振動・回転準位間の遷

移だ (図 1)。振動エネルギー準位は量子数 v で ($v = 0, 1, 2, \dots$)、回転エネルギー準位は量子数 J で表示される ($J = 0, 1, 2, \dots$)。とくに回転量子数 J が偶数のものをパラ水素、奇数のものをオルソ水素と呼ぶ。水素分子を考える際の重要な概念だが、簡単のため本稿では触れない。水素分子は等核 2 原子分子だから永久双極子モーメントを持たない。振動・回転遷移は電気 4 重極遷移で、選択則から許される J の変化は $-2, 0, +2$ に限られる (但し $J=0 \rightarrow J=0$ 遷移は禁止)。これらを S-, Q-, O-branch と呼ぶ。例えば波長 $2.12 \mu\text{m}$ の $v=1-0$ S(1)線は $v=1 J=3$ 準位から $v=0 J=1$ 準位への遷移である (括弧内の数字は下側準位の J の値)。この輝線は地上から観測可能な近赤外域 ($1-4 \mu\text{m}$) にある水素分子輝線の中で最も強い。最もよく調べられている。

水素分子が輝線として検出されるためには、基底準位から放射遷移の上側準位まで励起されなければならない。 $v=1-0$ S(1) 線の場合、上側準位 ($v=1 J=3$) は基底準位と 6951 K のエネルギー差がある。この差を克服して輝線を生成するための様々な機構が提案されている (図 1・表 1)。これらを順を追ってみていこう。

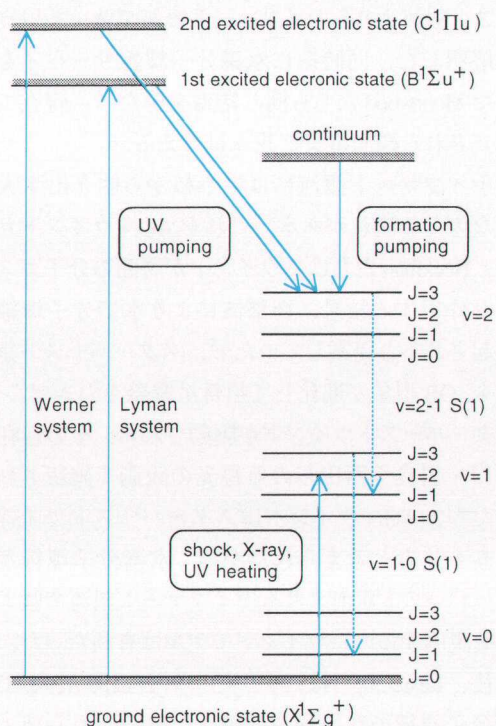


図1 水素分子の電子基底状態 $X^1\Sigma_g^+$ 内の振動・回転離散準位の一部 ($v = 0, 1, 2; J = 0, 1, 2, 3$) と振動・回転連続準位 (continuum). 赤外域で観測される輝線はこれら振動・回転離散準位間の電気4重極遷移である (文献1参照). このうち $v = 2-1 S(1)$ 線と $v = 1-0 S(1)$ 線を示す (波長は $2.25 \mu\text{m} \cdot 2.12 \mu\text{m}$). 赤外輝線の励起機構としては, 分子・原子・イオンとの衝突による熱的励起 (shock, X-ray, UV heating), 第1・第2電子励起状態 ($B^1\Sigma_u^+$ ・ $C^1\Pi_u$) を経由する非熱的紫外励起 (UV pumping), および水素分子の形成に伴う非熱的再結合励起 (formation pumping) がある.

表1 水素分子赤外輝線の励起機構

熱的励起	水素分子と分子・原子・イオンとの衝突	低速衝撃波の運動エネルギー ³⁾ AGN・衝撃波からのX線 ¹³⁾ OB型星・AGN・衝撃波からの紫外線 ¹⁸⁾
非熱的励起		
紫外励起	電子励起状態からのカスケード	OB型星・AGN・衝撃波からの紫外線 ⁹⁾
再結合励起	振動・回転連続準位からのカスケード	高速衝撃波内の水素分子再結合 ^{26), 28)}

2. 衝撃波による熱的励起?

当初有望視されていたアイデアが、衝撃波で加熱された高温・高密度ガス内での水素分子と分子・原子・イオンとの衝突である(衝撃波による熱的励起 = shock heating³⁾). 水素分子輝線が検出されていた銀河系内の天体は、その殆どが、質量放出をする原始星(Orion-KL)や超新星残骸(IC 443)と接している分子雲だったからだ¹⁾. このため活動銀河における水素分子輝線の研究は、活動銀河の動的過程の研究という側面をもっていた.

川良・西田らが水素分子輝線サーベイを始めたのは1985年である⁴⁾. 赤外線天文衛星IRASの観測をもとに遠赤外域(60・100 μm)で明るい所謂IRAS銀河が選ばれた. それまでに水素分子輝線の存在が知られていた3銀河はどれもIRAS天体だったからだ. 川良らは新たに15銀河で $v=1-0$ S(1)線を検出し、水素分子輝線の統計的研究が可能になった. 図2に結果を示す. 初期のサーベイではサンプルに制約があるため、輝線の絶対光度の統計は意味が無い. そこで $v=1-0$ S(1)線の強度を遠赤外連続光(40-120 μm)の強度で規格化する(縦軸). 遠赤外観測はIRASのもので銀河全体を見ている. 水素分子輝線の観測は各銀河の中心部のみを見ているから、測定領域の大きさ(A)を各銀河の直径(D)で規格化して示す(横軸). データ点は右上

がりに分布する. 水素分子輝線は広がった領域から出ているのだ. より重要な結果は、セイファート銀河(○)は左上にスターバースト銀河(●)は右下に分布することだ. 水素分子輝線はスターバースト銀河よりもセイファート銀河で強いと川良らは解釈した. 同時期に水素分子輝線サーベイを行ったMoorwoodたちも同じ結論を得た⁵⁾. 現在では確立された観測事実と我々は考える.

セイファート銀河には中心核から吹き出す大規模なガスの流れがある. これをAGNウインドと呼ぶ. Heckmanたちは、ウインドが周囲の分子ガスと相互作用する結果、衝撃波により水素分子輝線が励起されると提案していた⁶⁾. スターバースト銀河でも、OB型星が進化して超新星爆発を引き起こし、スターバーストウインドが駆動される. その存在は谷口・川良・西田らの可視光の観測で確認されていた⁷⁾. AGNウインドはスターバーストウインドよりも強力と考えられたから、水素分子輝線がスターバースト銀河よりもセイファート銀河で強いことを説明するのにウインドモデルは有利だった. その後、Lesterたちはスターバースト銀河M 82で水素分子輝線の空間分布を調べ、輝線が中心部の電離領域と周囲の分子雲との境界面から出ていることを突き止めた⁸⁾. 彼らもウインド的な大規模流による熱的励起を支持している.

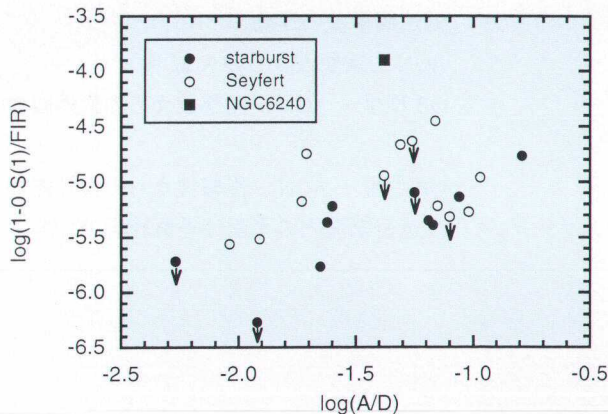


図2 セイファート銀河(○), スターバースト銀河(●), および相互作用銀河 NGC 6240(■)の水素分子輝線データ(文献4). 縦軸は水素分子輝線(1-0 S(1))と遠赤外連続光(FIR)との強度比. 横軸は各銀河の直径(D)で規格化された測定領域の大きさ(A). 水素分子輝線を放射する領域が広がっていることと水素分子輝線がスターバースト銀河よりもセイファート銀河で強いことがわかる.

3. 紫外線による非熱的励起?

前節のウインドモデルではあくまでも水素分子輝線が衝撃波により熱的に励起されることが前提だ。しかし水素分子輝線は他の機構でも励起される。図1を見てほしい。水素分子は紫外線 (912–1108 Å) を浴びると電子基底状態から第1・第2電子励起状態 ($B^1\Sigma_u^+$ $C^1\Pi_u$) に双極子遷移する (Lyman-Werner systems)。電子励起状態にある水素分子は紫外線を放射して電子基底状態に戻るが、かならずしも振動・回転基底準位に直行するのではなく、いったん振動・回転励起準位に落ちる。つまり電子励起状態を経由して電子基底状態の振動・回転基底準位から振動・回転励起準位に移動したことになり、水素分子赤外輝線が励起される。これが非熱的紫外励起 (UV pumping) である。

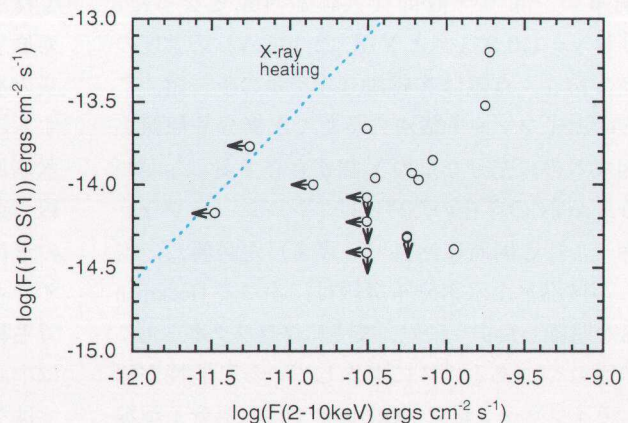
熱的励起と非熱的紫外励起は何組かの輝線の強度比を調べれば区別できる。熱的励起が下からの励起であるのに対し、非熱的紫外励起は上からの励起であるため、エネルギーの高い準位からの遷移が相対的に強くなるのだ。例えば $v=1-0$ S(1) 線と $v=2-1$ S(1) 線の場合、励起に必要なエネルギーは前者で 6951 K、後者で 12551 K だ。強度比 $2-1$ S(1) / $1-0$ S(1) は熱的励起ではせいぜい 0.1 だが、非熱的紫外励起では 0.5 まで上がる。もう少し詳しくみてみよう。熱的励起の場合、水素分子は振

動・回転準位間で熱平衡にある (この理由で熱的と呼ばれる)。高温・高密度の環境で衝突が頻繁に起こるからだ。よって熱的励起のスペクトルは振動・回転準位の平衡温度で決まる。観測値は 1000 K から 2000 K。非熱的紫外励起の場合、輝線の強度比は電子励起状態からの遷移確率で決まる。これはほぼ定数である。振動・回転準位間は熱平衡にはない (この理由で非熱的と呼ばれる)。衝突が無視できる低密度の環境が想定されていることに注意して欲しい。非熱的紫外励起は以前から Dalgarno たちにより存在が予言されていた⁹⁾。散光星雲 NGC 2023 等の銀河系内天体で観測的に確認されたのは 1980 年代中頃になってからのことだ¹⁰⁾。

1988 年、Puxley たちはスターバースト銀河の水素分子輝線を詳しく調べ、スペクトルが非熱的紫外励起に近いと報告した¹¹⁾。この結果に研究者達は動揺した。スターバースト銀河は大量の OB 型星を含んでいるから紫外光は充分あるのだ。Moorwood たちは直ちに追試を行い Puxley たちの仕事が間違いであることを公表した¹²⁾。要するに Puxley たちの使った分光器は精度が悪かったのだ。

しかし我々は彼等の仕事を評価したい。衝撃波一辺倒だった研究者たちに他の励起機構を検討する契機を与えたからである。そして紫外励起説自身、形を変えて蘇ることになる。

図3 セイファート銀河(○)における水素分子 $v=1-0$ S(1) 線の強度と X 線 (2–10 keV) の強度の比較(文献 14)。点線は X 線による水素分子輝線の熱的励起の予言値。殆どの天体が点線の右側にある、つまり水素分子輝線を励起するのに十分な X 線があることがわかる。



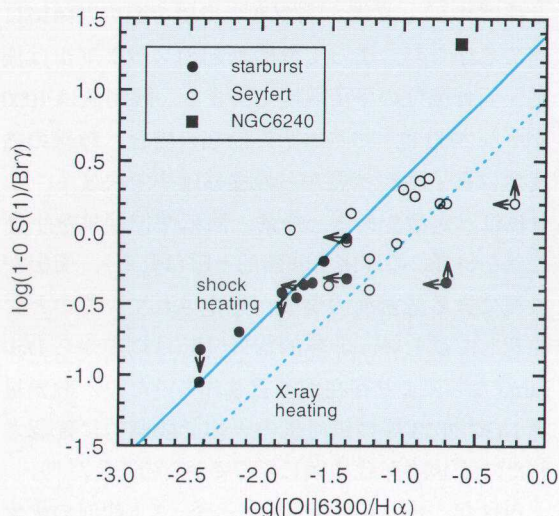


図4 セイファート銀河(○), スターバースト銀河(●), および相互作用銀河 NGC 6240(■)における水素分子輝線 (1-0 S(1)) と酸素原子輝線 ([OII]6300) の強度の比較(文献 17). 星間塵による減光の効果を相殺するため各々を水素原子再結合線 Br γ (2.17 μ m) と H α (6563Å) の強度で割り算してある. 実線・点線は超新星残骸 IC443 の観測値・X線励起モデルの予言値で, それぞれスターバースト銀河・セイファート銀河のデータをよく再現している.

4. X線による熱的励起?

熱的励起の場合, 分子雲を加熱するのは衝撃波に限らない. X線に暖められた分子雲中での熱的励起 (X-ray heating) は1983年に提案されている¹³⁾. セイファート銀河はスターバースト銀河に比べ強力なX線源だ. 川良・西田らは, 1985年から1988年にかけてセイファート銀河12天体で新たに水素分子 $v=1-0$ S(1) 線を検出し, このモデルを復活させた¹⁴⁾. 前回のサーベイでは遠赤外域で明るい天体が観測されたが, 今回のサーベイは可視域で明るい, より一般的な天体が対象となった. 図3は $v=1-0$ S(1) 線とX線 (2-10 keV) の強度の比較である. 点線はX線励起モデルの予言値. これらのセイファート銀河の多くで水素分子輝線を励起するのに十分な量のX線が存在することがわかる. AGNの存在のためにはエンジン (=ブラックホール) と同時に燃料 (=ガス) が必要だ. 川良らが検出した水素分子輝線は, かつて Heckman たちが期待したように⁶⁾, まさにブラックホールに供給されつつあるガスに由来している可能性が強い. セイファート銀河 NGC 1068 では水素分子輝線

が中心核近傍の幾つかの分子雲から出ていることがその後の研究で明らかになった¹⁵⁾. また Ward・西田らは電波銀河 Cygnus A においても検出に成功し¹⁶⁾, AGNからの水素分子輝線が普遍的であることを確かめている.

このシナリオの検証を1989年に毛利・谷口・川良・西田が行った¹⁷⁾. 図4は赤外の水素分子 $v=1-0$ S(1) 線と可視の酸素原子 6300 Å との比較である. 酸素原子輝線は, スターバースト銀河では衝撃波により, セイファート銀河ではX線により励起されることが既にわかっていた. 可視と赤外では星間塵による減光の効果が全く異なるが, 酸素原子・水素分子輝線の各々の強度を最も近い波長の水素原子再結合線 H α ・Br γ の強度で規格化することで, その違いが打ち消される. 減光前の水素原子再結合線の強度比が一定だからだ. 実線・点線は超新星残骸の観測値・X線励起モデルの予言値で, それぞれスターバースト銀河(●)・セイファート銀河(○)のデータをよく再現する. そこで毛利らは, 水素分子輝線はセイファート銀河では中心核からのX線により, スターバースト銀河ではウインドにより熱的に励起されると結論した.

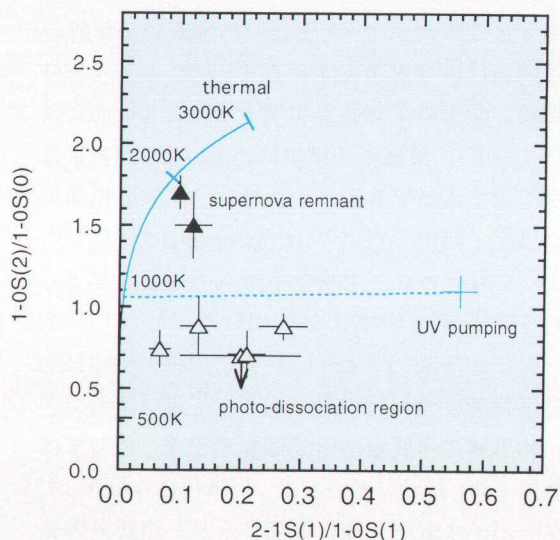


図5 光解離領域(Δ)および超新星残骸(\blacktriangle)における水素分子輝線の強度比(文献25)。実線は熱的成分、十字は非熱的紫外励起成分のモデル値。点線は熱的成分の1000 Kでの値と非熱的成分の値を結ぶ。光解離領域の熱的成分が1000 K以下なのに対し超新星残骸の熱的成分が2000 K程度であるのがわかる。光解離領域のデータが実線にのらないのは非熱的成分が存在するため、超新星残骸のデータが実線にのらないのは衝撃波内に温度勾配があるためである。

強度比 $v = 1-0 S(1) / Br\gamma$ と $[O I] 6300 / H\alpha$ がセイファート銀河で系統的に大きいことにも注意して欲しい。セイファート銀河の強力な X 線は効果的に水素分子・酸素原子輝線を励起するのだ。酸素原子輝線がセイファート銀河で強いことは有名で、セイファート銀河とスターバースト銀河を区別する指標として使われている。水素分子輝線が同じ目的に使えることは図4から明らかだ。

5. 紫外線による熱的励起?

水素分子の紫外線励起モデルが復権したのは1990年前後のことだ。低密度の分子ガスに紫外線が入射すると水素分子輝線の非熱的紫外励起が起こることは既に述べた。1989年に Dalgarno たちは高密度ガスに紫外線が入射した場合の水素分子スペクトルを計算した¹⁸⁾。密度が高いので分子間の衝突が頻繁に起こる。すると紫外線のエネルギーは分子雲の加熱に使われ、水素分子輝線が熱的に励起される。これを熱的紫外励起(UV heating)という。熱的紫外励起による水素分子輝線のスペクトルは衝撃波や X 線による熱的励起と殆ど区別できないのだ。OB型星からの紫外線にさらされた高密

度分子ガスは光解離領域と呼ばれ、主に星生成領域で見い出される。銀河系内の光解離領域で、衝撃波がないにもかかわらず熱的に励起された水素分子輝線が検出されて問題になっていた¹⁹⁾。現在では熱的紫外励起と考えられている。

スターバースト銀河が光解離領域を持つことは以前から知られていた。1990年に Puxley たちはスターバースト銀河の水素分子輝線データが紫外励起モデルと矛盾しないことを示した²⁰⁾。1991年に田中らは従来の“熱的か非熱的か”という二者択一の解析を批判した²¹⁾。強度比 $2-1 S(1) / 1-0 S(1)$ が熱的励起では0.1、非熱的紫外励起では0.5になることは前に述べた。スターバースト銀河での典型的な観測値は0.1-0.2である。つまり熱的成分が主要とはいえ非熱的紫外励起の寄与を完全には否定できない。非熱的紫外励起成分が存在するならば、熱的成分の起源も紫外励起と考える方が自然かもしれない。(この議論はもともと相互作用銀河 NGC 6240に関するものだが、むしろスターバースト銀河にあてはまる。)田中らのグループはまた銀河系内の散光星雲 NGC 2023等の光解離領域で熱的紫外励起と非熱的紫外励起が共存していることを確認

している²²⁾。

こうしてスターバースト銀河の水素分子輝線の起源問題は再び混迷を深めることになる。水素分子輝線が酸素原子輝線と相関を示すことは前に述べた(図4)。酸素原子輝線は間違いなく超新星爆発が駆動する衝撃波による励起だ。同様の相関解析が川良・西田・谷口²³⁾と Moorwood たち⁵⁾、¹²⁾によっても行われ、水素分子輝線の衝撃波による励起を主張する根拠になっていた。しかし、毛利・谷口が議論したように²⁴⁾、この種の相関は水素分子輝線が紫外線励起であっても実は説明できる。紫外線の主要な供給源はB型星だ。B型星はO型星よりも遥かに多いので、何世代にもわたってスターバーストが一様に継続すると、超新星爆発の頻度もB型星の数で決まる。水素分子輝線を励起する紫外線のエネルギーが、B型星を通して間接的に、酸素原子輝線を励起する衝撃波のエネルギーと相関するようになるのだ。

水素分子輝線の熱的成分はその温度で特徴づけられる。1994年に毛利は熱的成分の温度が衝撃波励起の場合と紫外線励起の場合で異なる可能性を指摘した²⁵⁾。図5の縦・横軸は水素分子輝線の強度比である。実線は熱的成分、十字は非熱的紫外線励起成分のモデル値、点線は熱的成分の1000 Kでの値と非熱的成分の値を結んでいる。紫外線励起である光解離領域のデータ(△)が点線の下側に分布するのに対し、衝撃波励起である超新星残骸のデータ(▲)は点線の上側に分布する。光解離領域の熱的成分が1000 K以下なのに対し超新星残骸の熱的成分は2000 K程度なのだ。即断は避けるべきだが、運が良ければ、熱的成分の温度を調べることでスターバースト銀河の水素分子輝線の起源問題に迫れるかもしれない。

6. 分子生成に伴う非熱的励起?

水素原子再結合線については前に触れた。水素イオンと電子が結合して水素原子をつくる際、水素原子の基底準位に直行せずに励起準位にいった

ん落ちることにより生成される。同じ原理で、水素分子が作られる際にも輝線が励起される。これを非熱的再結合励起(formation pumping)と呼ぼう。非熱的紫外励起と同じく上からの励起であることに注意して欲しい。

星間空間で水素分子を作るのは容易ではない。2つの水素原子が独立に動き回っている状態は水素分子の振動・回転連続準位に対応する(図1)。水素分子になることは、連続準位から離散準位に落ちることであり、余分なエネルギーを捨てる必要がある。ところが振動・回転遷移は双極子遷移ではないから、光の放射という形でエネルギーを捨てることはできない。つまり水素原子と水素原子が2体衝突しても水素分子は出来ない。現実には水素分子は次の2つのルートで形成される¹⁾。1番目は星間塵表面での形成。結合エネルギーを熱という形で星間塵に渡す訳だ。主要な水素分子形成過程とされるが、詳しいことは解っていない。星間塵の表面物性が不明だからだ。2番目は水素原子と水素のマイナスイオンとの反応で、水素分子を作って電子を放出する。高温ガス内や初期宇宙で重要と考えられる。これらの過程に伴う非熱的再結合励起の理論的研究がDalgarno たちにより行われた²⁶⁾。

活動銀河からの水素分子輝線に関して非熱的再結合励起は、毛利・谷口・川良・西田の簡単な議論¹⁷⁾を別にすれば、検討されてこなかった。ところが1989年にHollenbach たちは非熱的再結合励起が高速衝撃波からの水素分子輝線に大きく寄与することを示した²⁷⁾。それまでの研究は低速衝撃波($\leq 25\text{--}30 \text{ km s}^{-1}$)に限られていた。高速衝撃波は水素分子を破壊してしまうからだ。Hollenbach たちは敢えて高速衝撃波を考えた。この場合には水素分子はいったん全てが解離して原子やイオンになる。衝撃波が通り過ぎて時間がたつとガスが冷えて分子の再結合が起きる。よって高速衝撃波からの水素分子輝線は非熱的再結合励起による。非熱的再結合励起が上からの励起であることを思い

だして欲しい。正確な予想は困難だが、輝線の強度比は、衝撃波による励起であるにも関わらず、むしろ非熱的紫外励起に近いと思われる。

活動銀河の動的過程は多種多様だから分子雲への高速衝撃波は決して不自然ではない。毛利・谷口は1995年に活動銀河の水素分子輝線の非熱的成分に再結合励起が寄与する可能性を指摘した²⁸⁾。銀河系内の超新星残骸 IC 443 からの水素分子輝線について非熱的再結合励起の寄与を示唆するような観測が同じ年に報告された²⁹⁾。信頼できる理論的研究が待たれるが、今後の水素分子輝線の研究においてはこの励起機構に留意すべきだろう。

7. NGC 6240 の場合は？

相互作用銀河 NGC 6240 については冒頭で触れた。過去10年の研究はこの銀河の特異性を浮き彫りにしてきた。ここでは簡単に現在の状況をまとめてコメントしておく。

NGC 6240 が遠赤外域で異様に明るいことは IRAS 以来知られている。星間塵からの熱放射とされるが、エネルギー源は特定されていない。形態的には2つの銀河が合体しつつある相互作用銀河である。多数のB型星の存在が確認されているが、O型星は比較的少数と思われる。O型星はB型星より短命だ。NGC 6240 は爆発的星生成が終了したのちO型星が死に絶えたポスト＝スターバースト段階にあるのかもしれない²¹⁾。活動的銀河中心核の存在も示唆されている。また銀河の全面で衝撃波により加熱されたガスが観測されている。この衝撃波は銀河間の相互作用あるいはスターバーストウインドによると考えられるが詳細は不明だ。

水素分子輝線の強度が異様に強いことは有名である。図2や図4でNGC 6240 (■) が他の天体とは離れた場所にあることを確認して欲しい。輝線の絶対強度も今まで測定がなされた活動銀河中で最大。輝線巾が広いのも特色だ (550–650 km s⁻¹ FWHM)^{30), 31)}。他の銀河の輝線巾はせいぜい銀河の回転速度程度にすぎない (≤ 300 km s⁻¹ FWHM)。

水素分子輝線の空間分布のピークは、合体しつつある2つの銀河の中間地点にある³¹⁾。

最近になって菅井らが高精度分光観測に成功した。空間分布のピークで水素分子輝線は完全に熱的であった。温度は2000 K程度。輝線巾や空間分布の特徴を考慮すれば、銀河合体に伴う星間物質間の衝突が引き起こす低速衝撃波による熱的励起が最有力である³²⁾。(図5から明らかのようにNGC 6240の熱的成分の温度を紫外励起で説明するのは困難だ。)同様のモデルをLesterたちが1988年に彼等の観測に基づいて提案していた³⁰⁾。画期的な仕事だったが非熱的成分の寄与の余地がデータにあり異論が続出した^{21), 28)}。菅井らは非熱的成分の寄与を否定して長年の論争に終止符を打ち「銀河合体に伴う衝撃波」説を復活させたのだ。

8. 今後の展望は？

活動銀河からの水素分子輝線についてはなお多くが謎である。水素分子輝線がスターバースト銀河よりもセイファート銀河で強いことは確かな事実と思われる。セイファート銀河ではX線による熱的励起が有望だ。スターバースト銀河では紫外線もしくは衝撃波による熱的励起であろう。非熱的紫外励起が卓越している可能性のあるスターバースト銀河もない訳ではないが³³⁾。いずれの場合でもB型星が重要な役割を担っている筈だ。非熱的再結合励起の寄与について論じるのは時期尚早である。理論の発展に期待したい。そして相互作用銀河 NGC 6240 では銀河合体に伴う衝撃波による熱的励起の可能性が高い。

今後の観測的研究の方向について一言。本稿では近赤外データに基づいて話をした。しかし水素分子輝線は中間赤外域 (10–30 μ m) にも可視域 (8000Å) にも存在する。中間赤外域には0–0 S(0), 0–0 S(1)等の純回転遷移があり、可視域には振動量子数 v が大きい遷移がある。特に中間赤外域の観測については昨年末に打ち上げられた天文衛星 ISO の成果に注目していきたい³⁴⁾。より広い範囲でス

ベクトルを検討した時、現在の疑問点の幾つかは解決をみるだろう。それはまた新たな謎の始まりになるのかもしれないが。

最新のデータを提供していただいた菅井肇氏、原稿を読んで貴重なコメントをいただいた窪谷浩人氏・上杉智子氏・中川貴雄氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Shull, J.M., Beckwith, S., 1982, ARA&A, 20, 163
- 2) Joseph, R.D., et al., 1984, Nature, 311, 132
- 3) Shull, J.M., Hollenbach, D.J., 1978, ApJ, 220, 525; Brand, P.W.J.L., et al., 1988, ApJ, 334, L103
- 4) Kawara, K., et al., 1987, ApJ, 321, L35
- 5) Moorwood, A.F.M., Oliva, E., 1988, A&A, 203, 278
- 6) Heckman, T.M., et al., 1986, ApJ, 305, 157
- 7) Taniguchi, Y., 1987, ApJ, 317, L57; Kawara, K., et al., PASP, 99, 512; Taniguchi, Y., et al., 1988, AJ, 95, 1378
- 8) Lester, D.F., et al., 1990, ApJ, 352, 544
- 9) Black, J.H., Dalgarno, A., 1976, ApJ, 203, 132; Black, J.H., van Dishoeck, E.F., 1987, ApJ, 322, 412
- 10) Gatley, I., et al., 1987, ApJ, 318, L73
- 11) Puxley, P.J., et al., 1988, MNRAS, 234, p29
- 12) Moorwood, A.F.M., Oliva, E., 1990, A&A, 239, 78
- 13) Lepp, S., McCray, R., 1983, ApJ, 269, 560; Krolik, J.H., Lepp, S., 1989, ApJ, 347, 179; Draine, B.T., Woods, D.T., 1990, ApJ, 363, 464; Gredel, R., Dalgarno, A., 1995, ApJ, 446, 852
- 14) Kawara, K., et al., 1989, ApJ, 342, L55; Kawara, K., et al., 1989, Nature, 341, 217; Kawara, K., et al., ApJ, 352, 433
- 15) Blietz, M., et al., 1994, ApJ, 421, 92
- 16) Ward, M.J., et al., 1991, ApJ, 382, 115
- 17) Mouri, H., et al., 1989, ApJ, 346, L73
- 18) Sternberg, A., Dalgarno, A., 1989, ApJ, 338, 197; Burton, M. G., et al., 1990, ApJ, 365, 620
- 19) Zuckerman, B., Gatley, I., 1988, ApJ, 324, 501
- 20) Puxley, P.J., et al., 1990, ApJ, 364, 77
- 21) Tanaka, M., et al., 1991, ApJ, 374, 516
- 22) Tanaka, M., et al., 1989, ApJ, 336, 207
- 23) Kawara, K., et al., 1988, ApJ, 328, L41
- 24) Mouri, H., Taniguchi, Y., 1992, ApJ, 386, 68; Mouri, H., 1992, MNRAS, 257, 433
- 25) Mouri, H., 1994, ApJ, 427, 777
- 26) Black, J.H., et al., 1981, ApJ, 249, 138; Le Bourlot, J., et al., 1995, ApJ, 449, 178
- 27) Hollenbach, D., McKee, C.F., 1989, ApJ, 342, 306
- 28) Mouri, H., Taniguchi, Y., 1995, ApJ, 449, 134
- 29) Richter, M.J., et al., 1995, ApJ, 454, 277
- 30) Lester, D.F., et al., 1988, ApJ, 329, 641
- 31) van der Werf, P.P., et al., 1993, ApJ, 405, 522
- 32) Sugai, H., et al., 1995, BJAS, S20a; Sugai, H., et al., 1996, Astrophys. Lett. Comm., in press; Sugai, H., et al., 1996, in preparation
- 33) Vanzi, L., et al., 1996, ApJ, 466, 150
- 33) Volentijn, E., 1996, submitted to A & A

Origin of Extragalactic H₂ Emission

Hideaki MOURI

Meteorological Research Institute, Nagamine 1-1, Tsukuba 305, Japan

Kimiaki KAWARA

ISO Science Operations Centre, Astrophysics Division of ESA, Villafranca Del Castillo, P. O. Box 50727, 28080 Madrid, Spain

Minoru NISHIDA

Hyogo, Kobe 652, Japan

Yoshiaki TANIGUCHI

Astronomical Institute, Tohoku University, Aoba, Sendai, 980-77, Japan

The origin of near-infrared H₂ emission from Seyfert and starburst galaxies is still a puzzle. We review various scenarios that have been proposed during the last decade: shock heating, UV pumping, X-ray heating, UV heating, and formation pumping.